第8回 光赤外線天文学大学間連携ワークショップ

月食の偏光観測

高橋 隼（兵庫県立大学）

はじめに

- **忘れられた謎: 月食の偏光**
  - 月食中の月は、地球大気を透過し僅かに屈折された太陽光に照らされる。
  - Coyne & Pellicori (1970) は、月食中の月が2.4%偏光していたと報告。
  - 偏光の原因は解明されていないが、かれらの報告以降、研究された形跡なし。

- **「月食の偏光」に再注目する理由**
  - 物理的な興味
    - 太陽-地球-月が一直線に並ぶ位置関係で偏光が生じるのは不思議。
    - なぜ偏光するのか？
  - 新しい研究手法への期待
    - もし惑星大気を透過する際に偏光が生じるのであれば、太陽系内外の惑星大気の新しい研究手法に応用できるかもしれない。
- **本研究の目標**
  - 月食の偏光を確認し、偏光の時間変化と波長依存性から原因を解明する。

キャンペーン観測

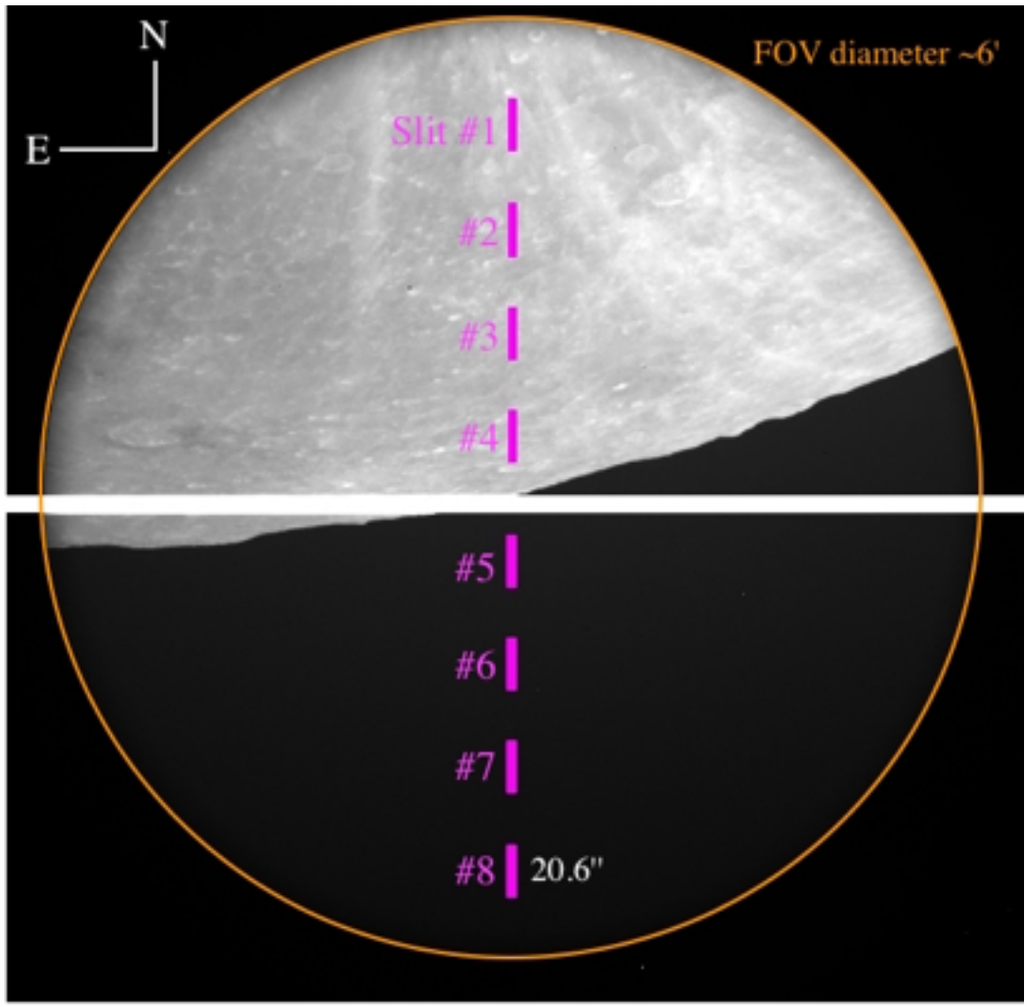
- **2014年10月8日 皆既月食**
  - OISTERキャンペーン
    - 偏光撮像: ピリカ/MSI（北海道大）、60cm/同時偏光装置（兵庫県立大）、かなた/広島大(HOWPol)
    - 多色撮像: SaCRA/主焦点カメラ（埼玉大）、木曽シュミット/KWFC（東京大）
- **2015年4月4日 皆既月食**
  - OISTERキャンペーン
    - 2014年と同様の施設に依頼。悪天候で観測不可または有効なデータ取得できず。
  - すばる望遠鏡/FOCAS での偏光分光観測 → Takahashi+ (2017, AJ)

2015/04/04 皆既月食

すばる/FOCASでの観測

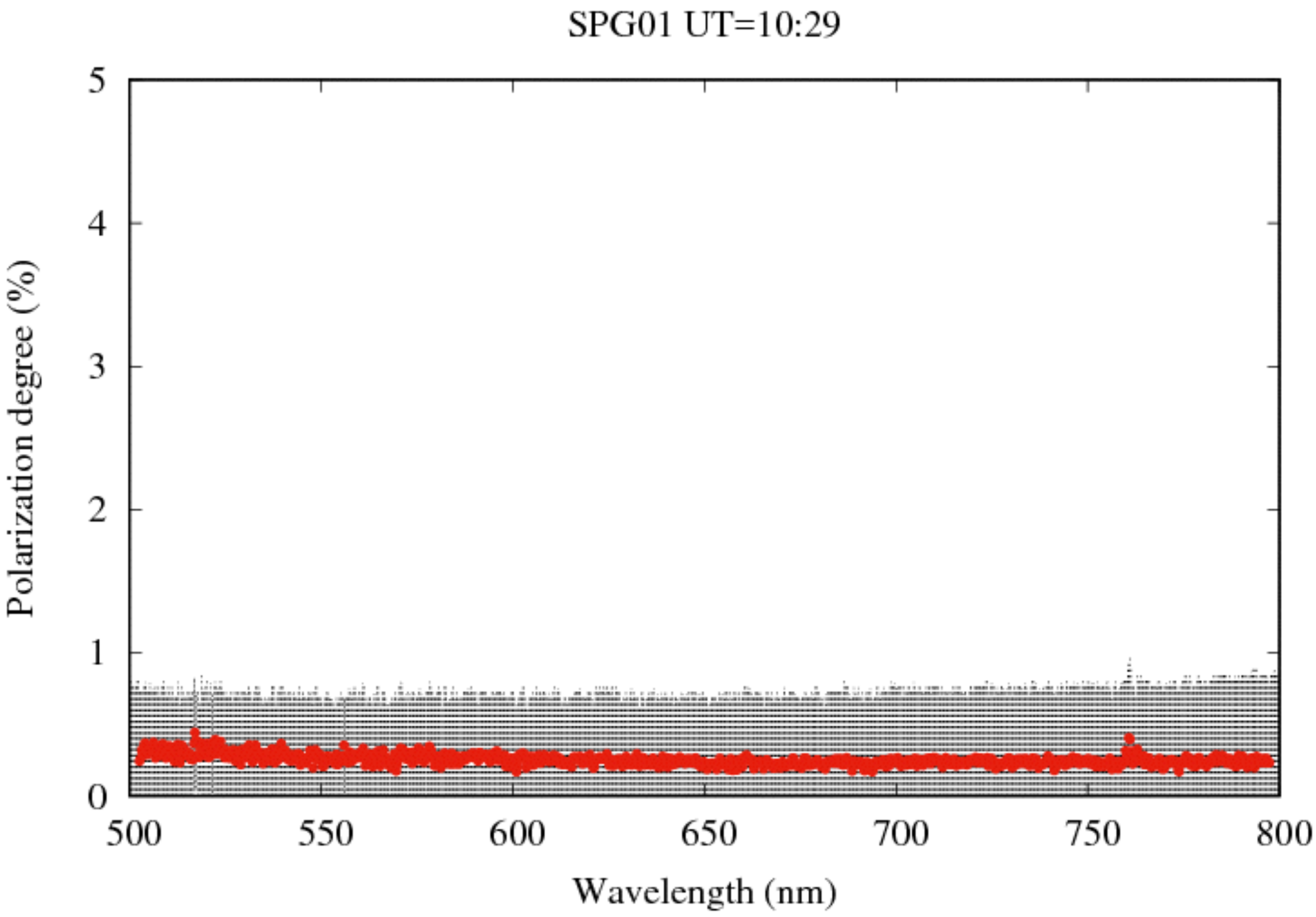
2015年4月4日の月食を偏光分光観測した。

- 望遠鏡：すばる望遠鏡
- 装置：FOCAS (Kashikawa+ 2000)
- 観測対象領域: 月の南端、Le Gentil A クレータ付近
    - 4つのスリットを月に、残り4つをスカイに向けた。
    - 対象領域が地球の影（本影）に入る直前から出る直後まで観測。後半は曇り。

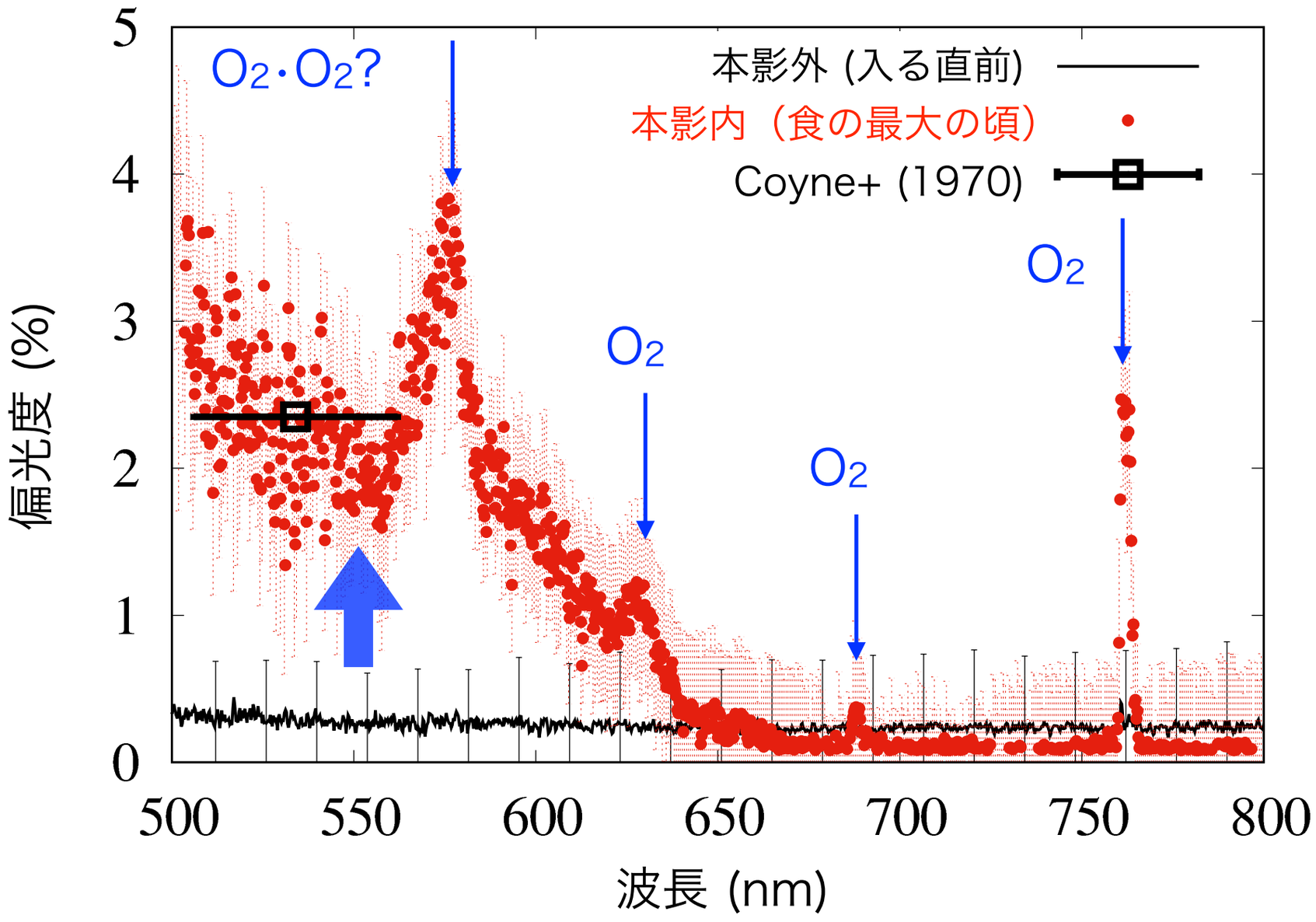


- 取得波長域：500 - 800 nm
- 波長分解能 ($R=\lambda/\Delta\lambda$): 200 (2.0″スリット)、1000 (0.4″)

観測結果: 偏光度スペクトル



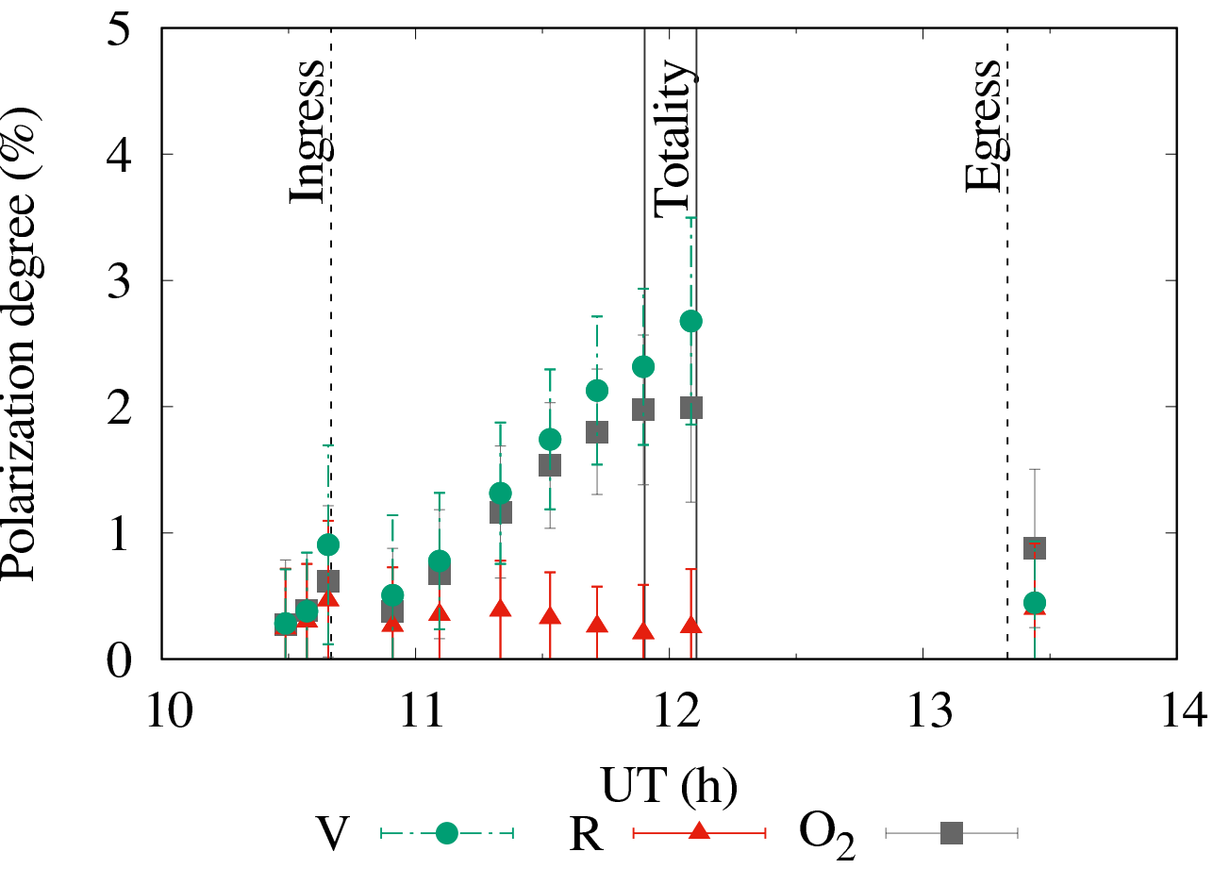
観測結果: 偏光度スペクトル



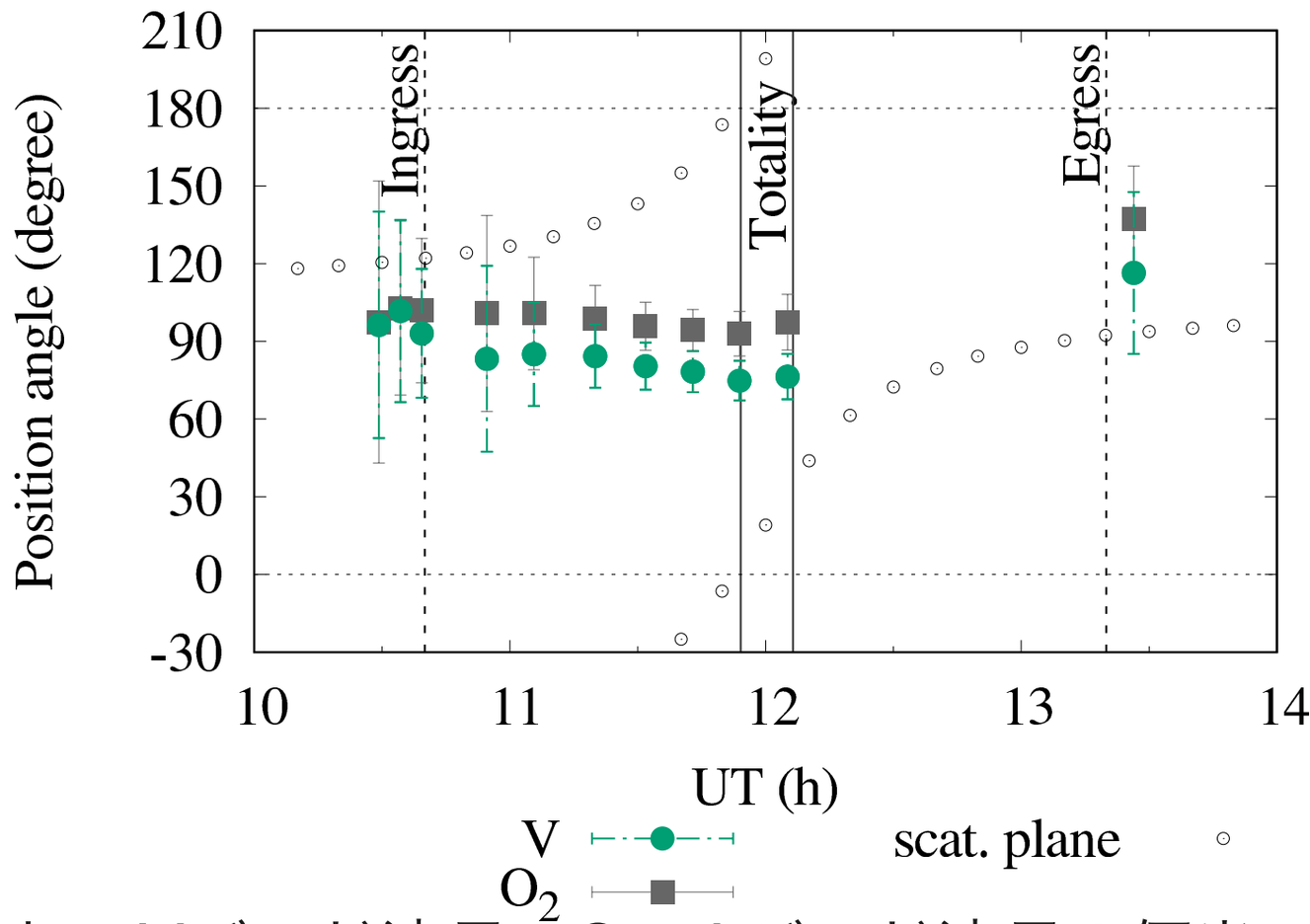
- 対象領域が本影に入る前は、全波長域にわたってほぼ無偏光。
- **本影に入って以降、食が深くなるにつれ、波長600nm以下での偏光度が上昇した。**最大で2-3%程度。Coyne & Pellicori (1970)の報告とよく一致する。
- 760nm O_2 Aバンド等、偏光度の強いフィーチャも見られる。

偏光度P, 方位角Θ 時間変化

偏光度 P



偏光方位角 Θ



- 本影に入って以降、食が深くなるにつれ、Vバンド波長、O_2 Aバンド波長の偏光度が上昇した。
- 偏光方位角は、東西方向でほぼ一定だった。

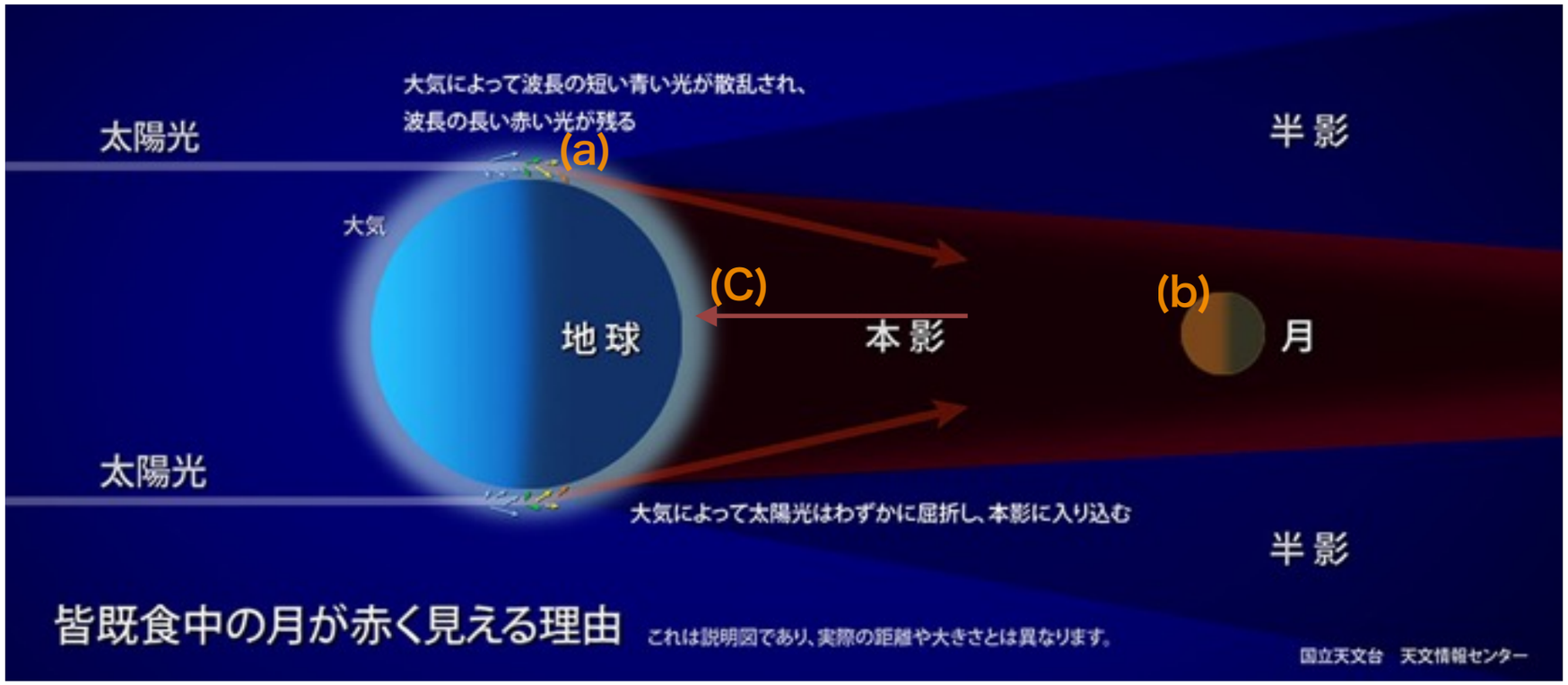
議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

(c) 2回目の地球大気透過



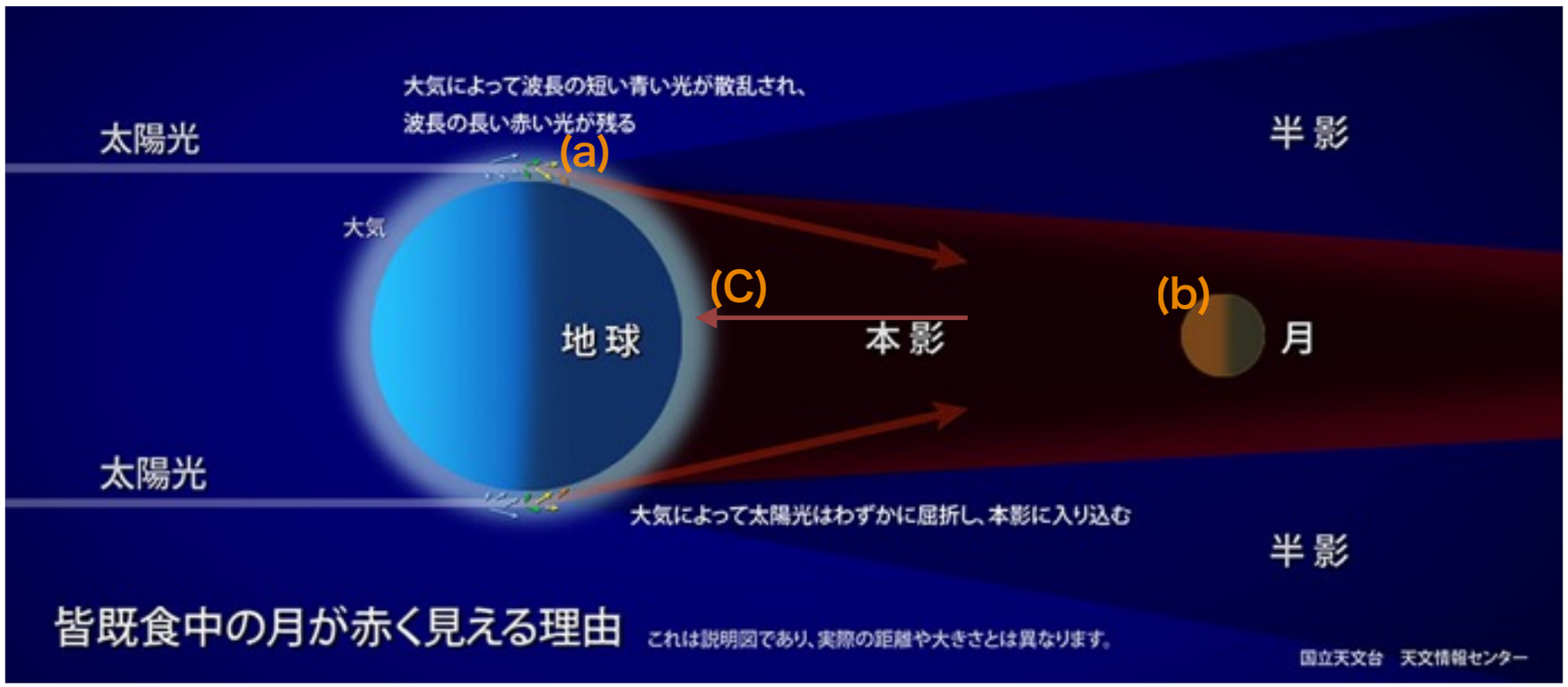
議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

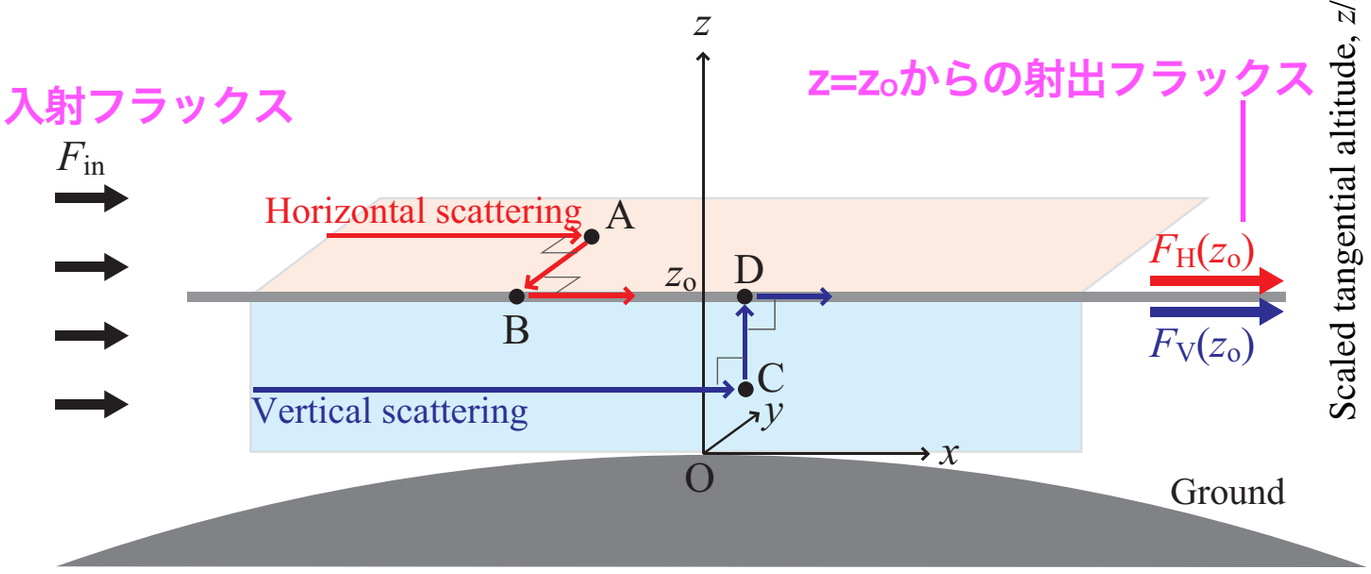
(c) 2回目の地球大気透過

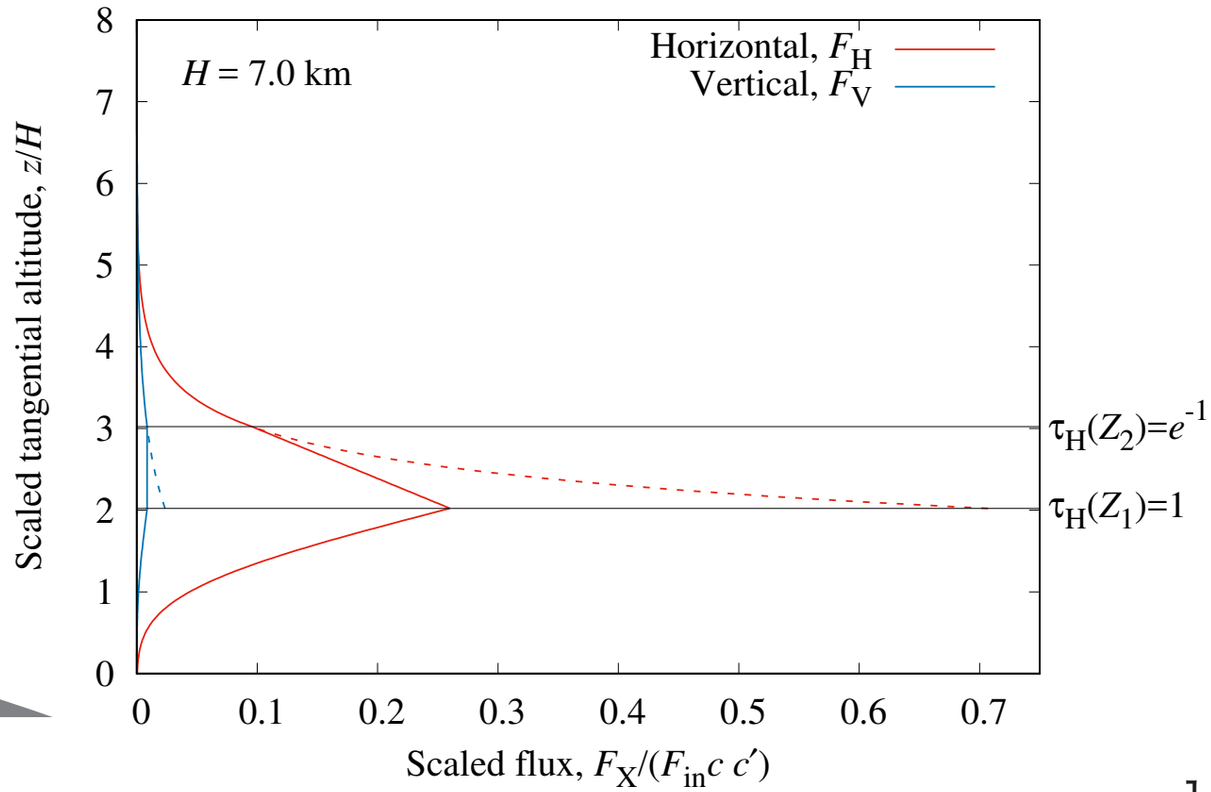


(a) 1回目の地球大気透過

- 直進成分（直接屈折光+1回前方散乱光）
  - ほとんど偏光しない（前方散乱 P<0.005%、屈折 P<0.03%）
- 2回散乱成分
  - フラックスは水平散乱が垂直散乱より圧倒的に強い(←$\tau_H >> \tau_V$)

➡射出光は垂直方向に偏光するはず。





観測結果との整合性

2回散乱成分の偏光度(~100%)　　水平散乱成分flux

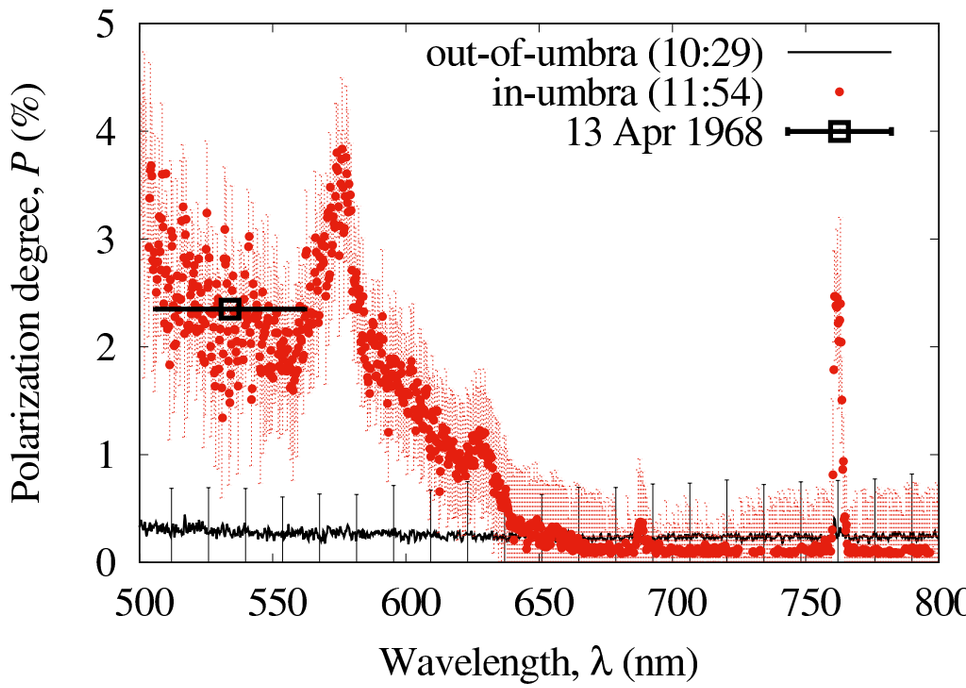
$$P_{\rm e} = \frac{P_{\rm db}\Phi_{\rm db}}{\Phi_{\rm db}+\Phi_{\rm fwd}} \cong \frac{\Phi_{\rm H}}{\Phi_{\rm H}+\Phi_{\rm fwd}} = (1+a\mathcal{T}(\lambda))^{-1}$$

ある地点上空の射出光の偏光度　　直進成分のflux　　大気の透過率

2回散乱成分のflux

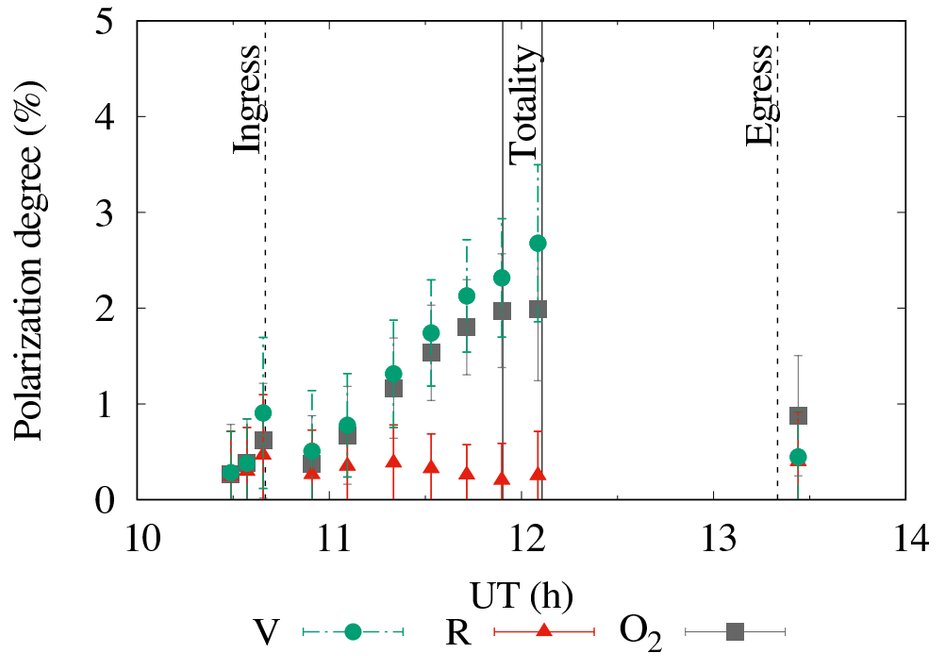
$$\Phi_{\rm H} \equiv \int_0^\infty F_{\rm H}(z){\rm d}z \cong \frac{\sqrt{2}}{4}\left(\frac{3}{e}+\frac{2}{e^2}\right)F_{\rm in}cc'H,$$

$$\Phi_{\rm fwd} \propto F_{\rm in}\mathcal{T}$$



- 偏光度スペクトルの全体的な波長依存性
  - $\mathcal{T}$(長波長ほど大きい)の裏返し
- 強偏光フィーチャの存在
  - $\mathcal{T}$(吸収帯あり)の裏返し
- 偏光度の時間変化
  - 食が深くなるほど$\Phi_{\rm fwd}$ は小さくなる。

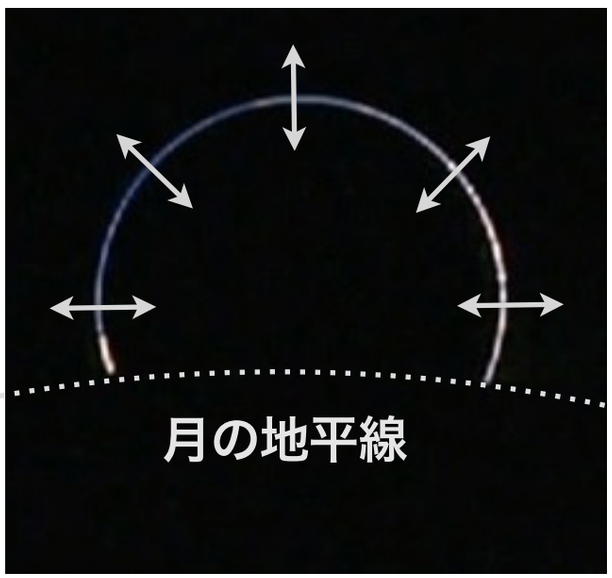
    (大きな屈折角→低い高度→大きい減光)



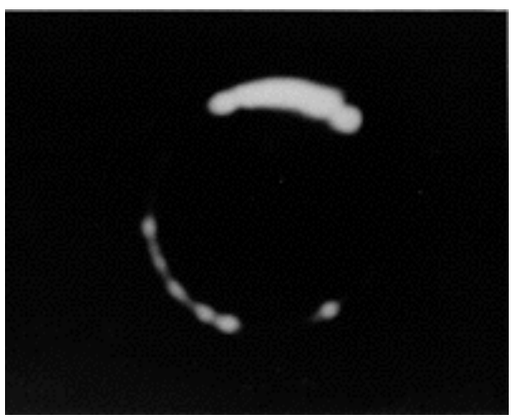
「1回目の大気透過中の2回散乱」で、月食観測結果の特徴を説明できる

緯度方向の非一様性

月食中に月から見た地球



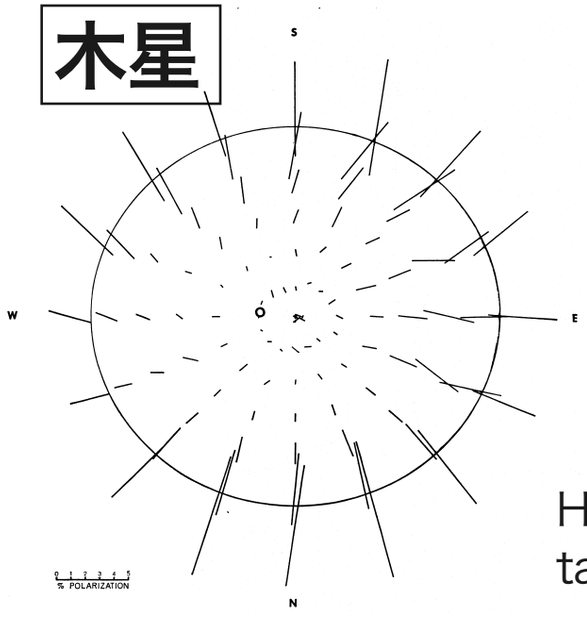
Kaguya



Surveyor III

- 月食中に月から地球を見ると、「リング」に見える。
- リングの偏光方位角は放射状に分布していると考えられる(cf. 木星)。
- 地球からの月食観測では、リングを積分した光を見ている。
- 月食が偏光するには、リングの偏光フラックスに何らかの非一様性が必要。
  - 観測された偏光方位角が東西なので、赤道付近が極に卓越。
  - 雲の分布？、H の違い？

木星



Hall and Riley1969
taken from Gehrels+ 1969

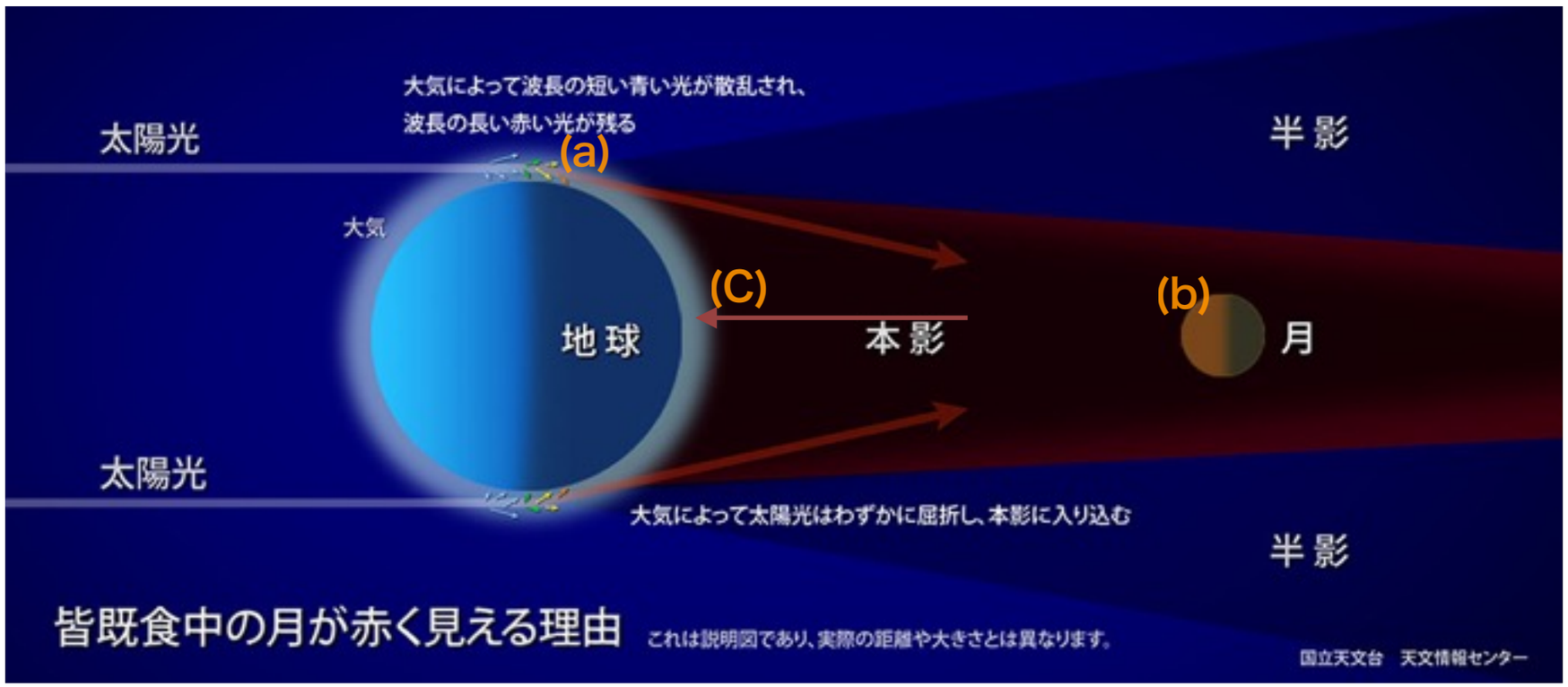
議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

(c) 2回目の地球大気透過



(b) 月面での反射

- 偏光衝効果 (polarization opposition effect)
  - 位相角が非常に小さいときに(<2°)、偏光度増大が見られる現象
  - いくつかの小惑星や衛星で確認されている。
  - 典型的な偏光度は、0.3-0.5% (Rosenbush+ 2009)
  - 月について地上観測での検出例はないが、月試料の室内測定例はあり (P~0.5%)。
  - 大局的な波長依存性は小さい。せいぜいファクター2 (Rosenbush+ 2005).
  - 大気のない月面での現象なので、O_2 A帯(760nm) での強偏光フィーチャの存在を説明できない。

月面での偏光衝効果では、月食観測結果を説明できない。

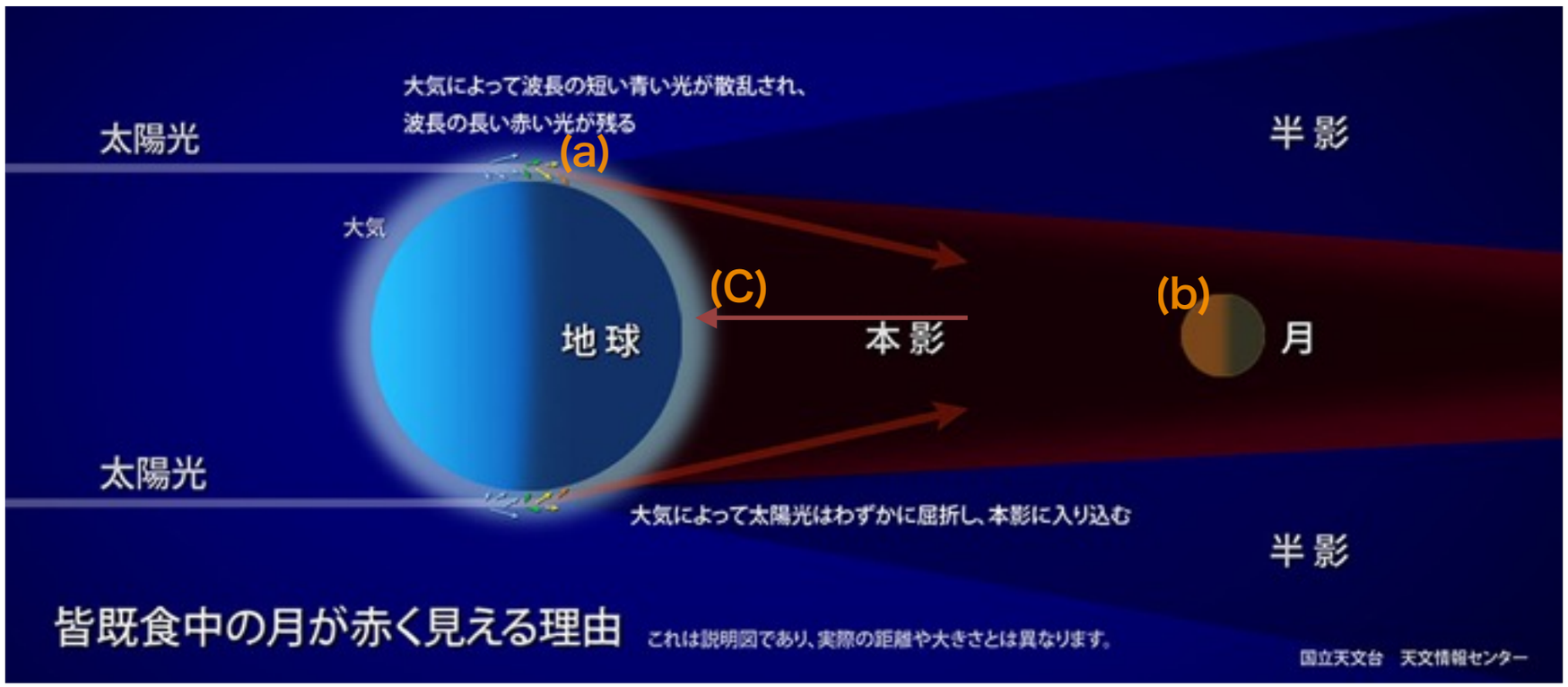
議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

(c) 2回目の地球大気透過



(c)2回目の地球大気透過

- 2回散乱で偏光？
  - 1回目の透過: 水平に入射 (grazing incidence)
    - 非等方性（水平散乱と垂直散乱のフラックス差異）が最大化
  - 2回目の透過: ほぼ垂直に入射
    - 非等方性が小さい ➡ 偏光小さい。

- 散乱成分の扱い
  - 偏光するのは散乱成分。直進成分は偏光しない。
  - 2回目の透過中の散乱成分とは「スカイ」のこと。
  - スカイは解析で除去している。

2回目の地球大気透過は、観測された月食偏光の原因ではない。

2015年4月観測 まとめ

- はじめて月食の偏光分光観測を行った。
- 観測対象領域が本影に入る前は、全波長域にわたってほぼ無偏光であった。
- 観測対象領域が本影に入って以降、600nmより短い波長やO_2 A帯(760nm)の偏光度が上昇した。最大で2-3%程度。
- 観測された偏光は、「1回目の地球大気透過中の非等方的2回散乱」と「緯度方向の何らかの非一様性」の組み合わせにより定性的に説明できる。
- 惑星大気透過による偏光を理解できれば、惑星の「トランジット偏光観測」が拓ける？？
    - O_2の検出、緯度非一様性

Takahashi+ (2017, AJ)

2014/10/08 皆既月食

2014年10月 キャンペーン

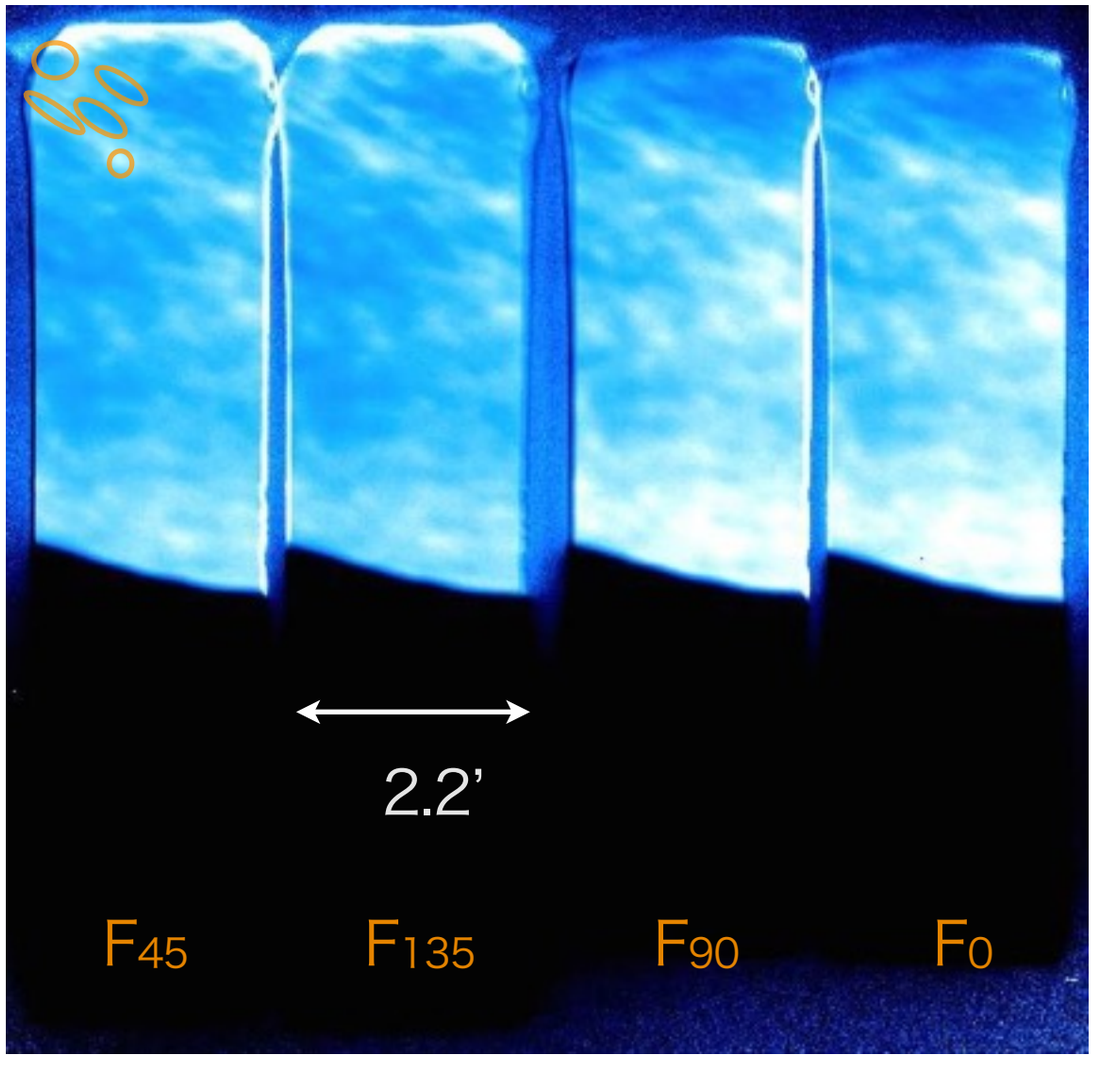
- **偏光撮像観測**

大学／施設	望遠鏡 (月追尾)	装置 (波長)	観測時刻 (UT 頃)	一次処理済 データ取得	偏光度、方 位角導出
北海道大学 理学研究院附属天文台	1.6m ピリカ (○)	MSI (V, R, 552nm,659nm)	9:20~13:13	✓	✓ (V, R)
兵庫県立大学 西はりま天文台	60cm望遠鏡 (×)	同時偏光撮像／分光 装置 (B, V, R)	9:30~12:40	✓	✓ (V, R)
広島大学 東広島天文台	1.5m かなた (○)	HOWPol (V, R)	9:30~12:10	✓	✓ (V, R)

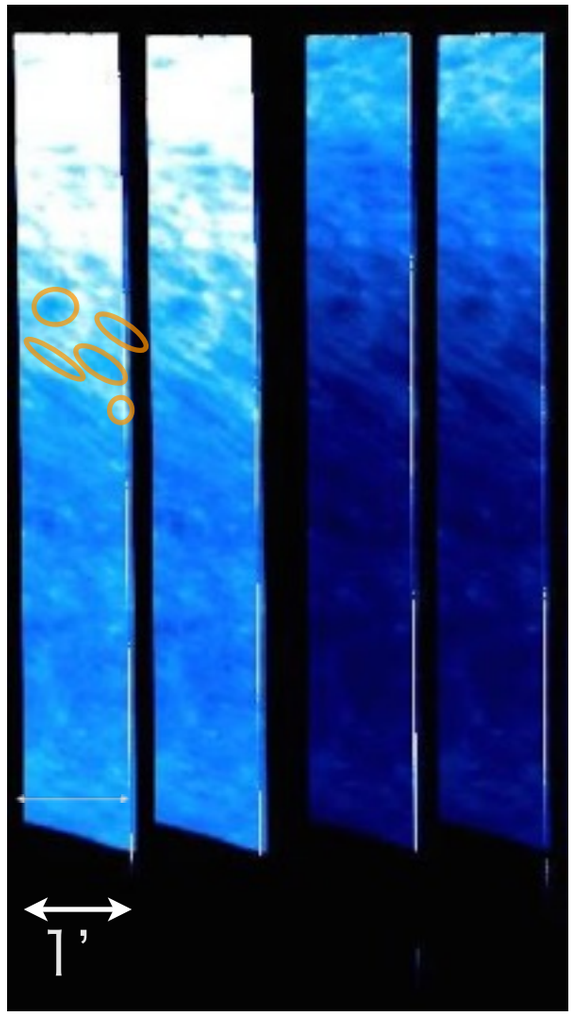
2014年10月 キャンペーン

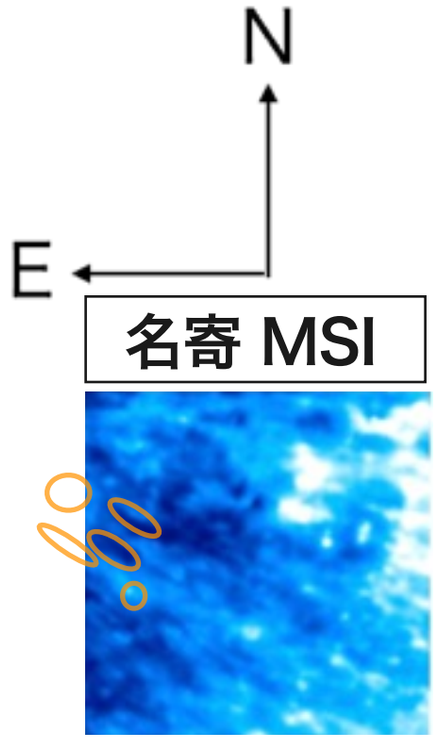
- 取得画像

西はりま 同時偏光装置

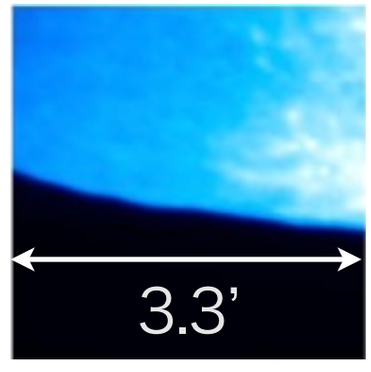


東広島 HOWPol





名寄 MSI

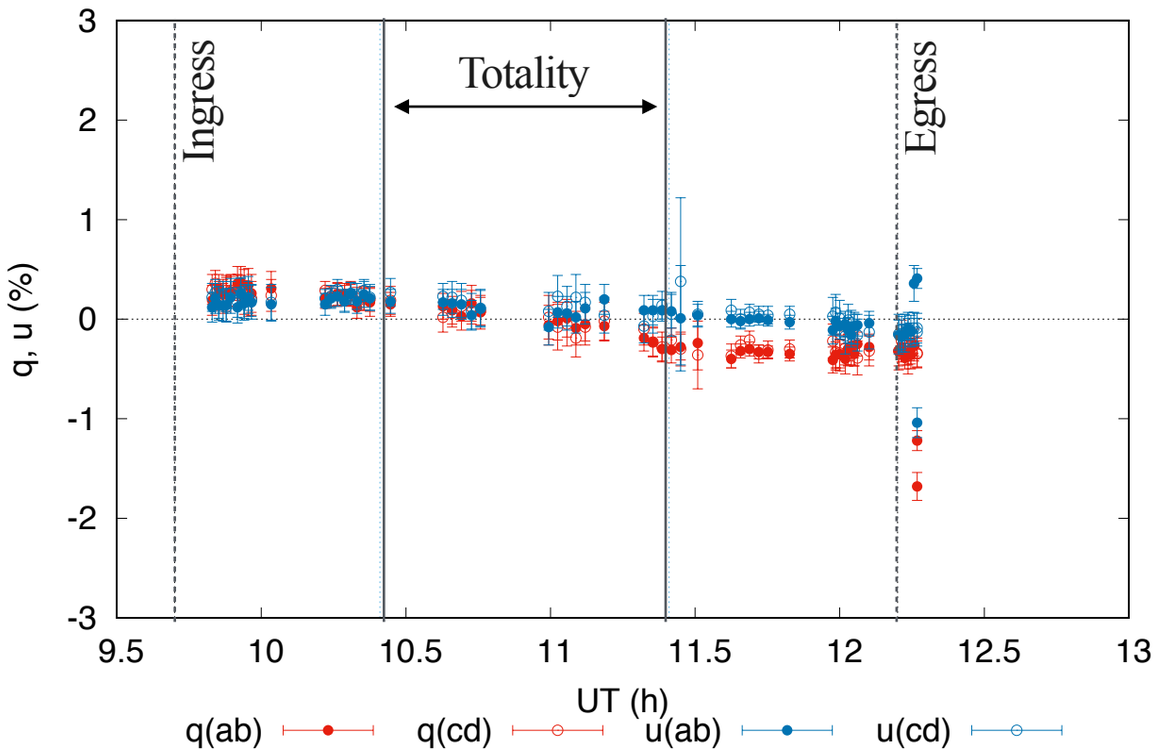


2014年10月 観測結果

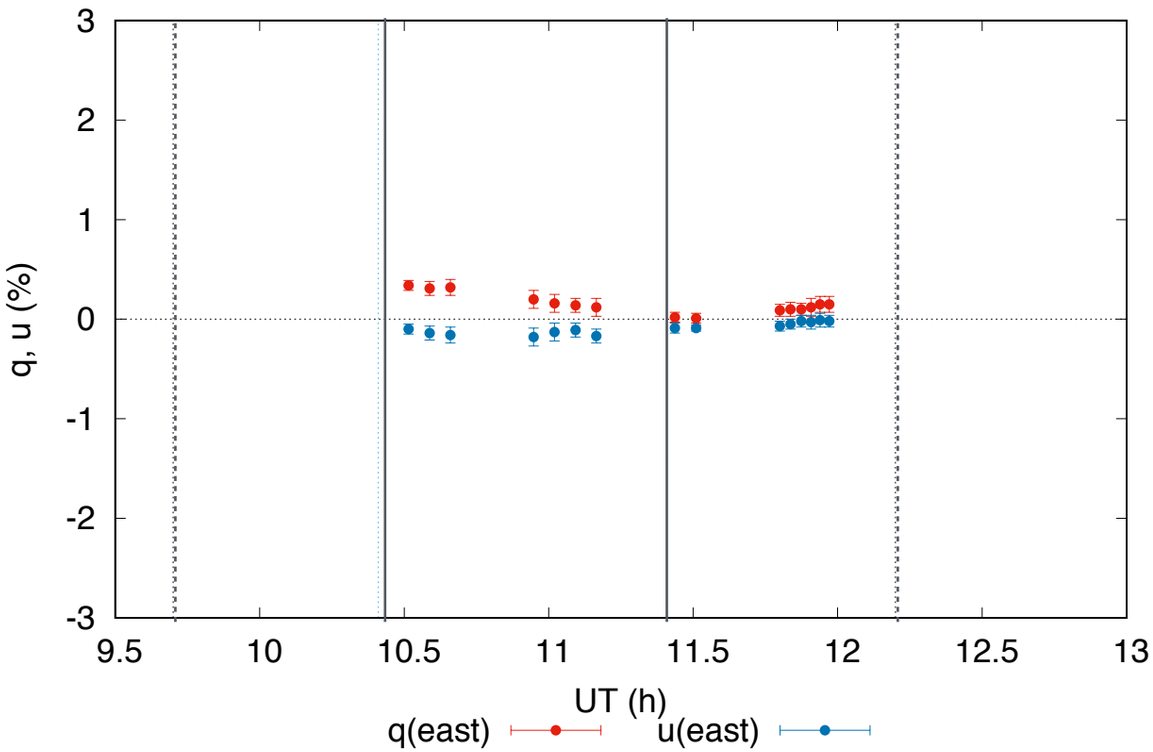
ストークス $q=Q/I$, $u=U/I$

偏光度 $P=(q^2+u^2)^{1/2}$

名寄



東広島



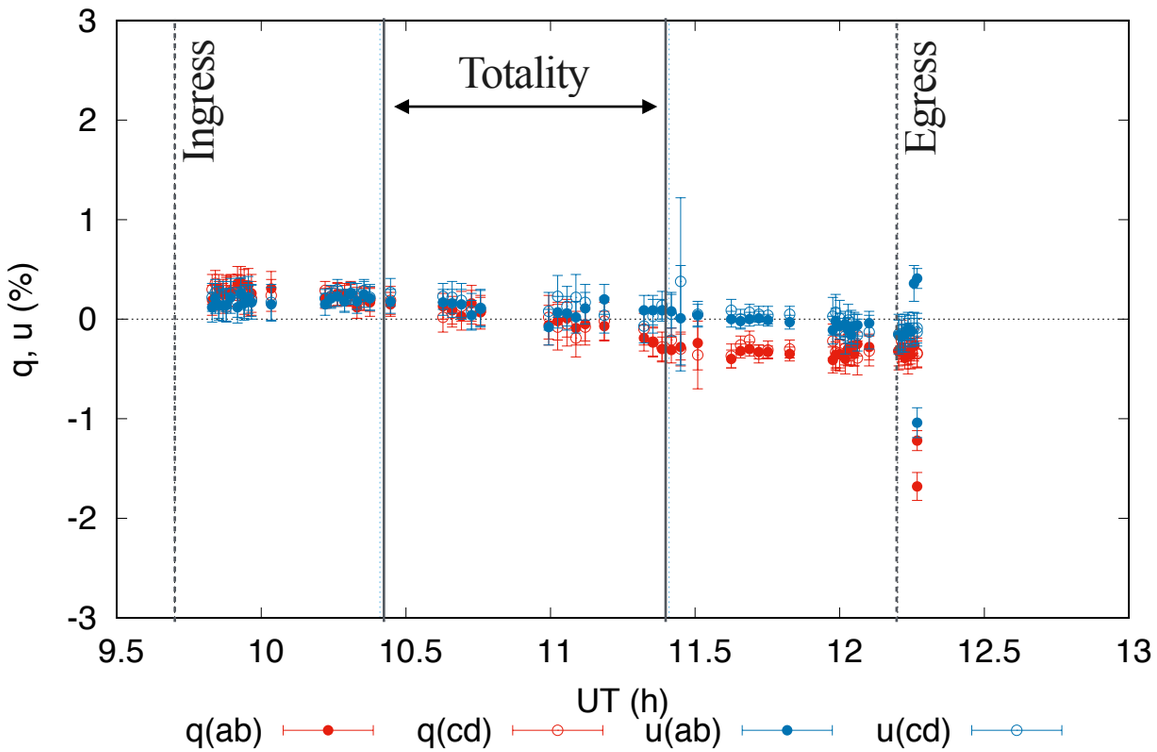
- $|q|, |u| < 0.5\% \rightarrow P < 1\%$
- 2015年4月（$P_{\max}$~2%）に比べて、偏光度は小さかった。
- 月食中の偏光度は、回ごとに違うことが分かった。
- 何が偏光度の大小を決めるのか、今後議論。地球の気象条件？

2014年10月 観測結果

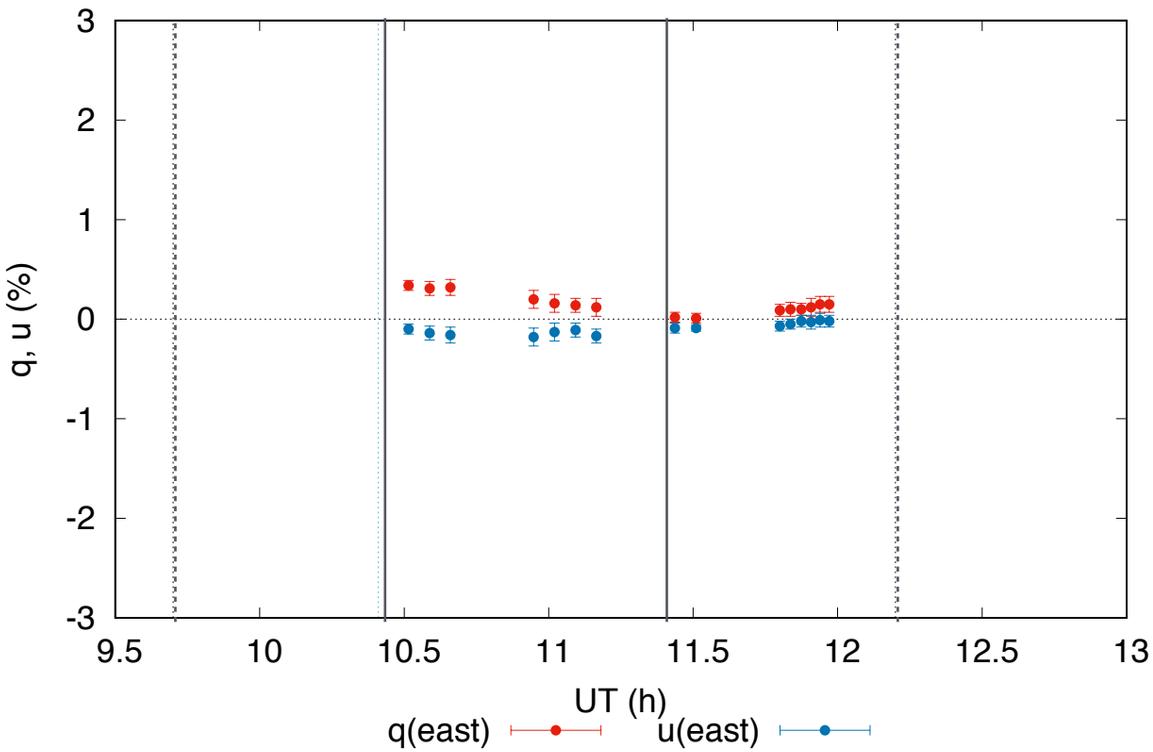
ストークス $q=Q/I$, $u=U/I$

偏光度 $P=(q^2+u^2)^{1/2}$

名寄



東広島



- $|q|, |u| < 0.5\% \rightarrow P < 1\%$
- 2015年4月（$P_{\max}$~2%）に比べて、偏光度は小さかった。
- 月食中の偏光度は、回ごとに違うことが分かった。
- 何が偏光度の大小を決めるのか、今後議論。

今後について

- 2014年10月のデータ解析をもうすこし精査。

- 何が月食中の偏光度大小を決めるのか、2014年10月と2015年4月の雲や温度の分布を比較して議論。　→ 論文化

- 2回の月食観測結果だけで、月食の偏光の支配要因を決定づけるのは困難だと考えられる。

- 月食偏光モニター観測をOISTERキャンペーンとして提案することを検討中。
    - 目標サンプル数: 5回
    - 直近の皆既月食: 2018年1月31日